

# 考虑损伤因素的单层平面索网静力试验研究

施刚<sup>1</sup>, 左勇志<sup>2</sup>, 郑敬杰<sup>2</sup>, 霍达<sup>3</sup>

(1. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 北京市建筑工程研究院, 北京 100039;  
3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:**在单层平面索网玻璃幕墙建筑的使用过程中,单层平面索网作为支承结构,不可避免地会受到各种损伤。为了研究损伤因素对单层平面索网结构静力承载性能的影响,针对尺寸为4.85m×4.85m的4×4网格索网结构足尺试验模型,分别引入索与索之间连接节点失效、索预应力损失、索锚固端破坏这三种损伤因素,进行静力加载试验研究。试验结果表明:横索与竖索连接节点失效几乎不影响单层平面索网结构的承载性能;索预应力损失时,节点索网平面外位移变化率不超过15%;锚固端破坏对结构局部影响较大,节点平面外位移变化率介于18%~36%;损伤因素对节点平面外位移的影响大于索力;损伤的影响取决于损伤程度和损伤位置;相同损伤对结构的影响程度随荷载增加而减小。

**关键词:**单层平面索网; 损伤因素; 足尺试验; 静力性能

**中图分类号:** TU394 **文献标志码:** A

## Experimental study on the single-layer plane cable net with the influence of damages

SHI Gang<sup>1</sup>, ZUO Yongzhi<sup>2</sup>, ZHENG Jingjie<sup>2</sup>, HUO Da<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Beijing Building Construction Research Institute, Beijing 100039, China;  
3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** During the service of single-layer plane cable net supported glass buildings, as the supporting structure the single-layer plane cable net will inevitably be subjected to different types of damages. In order to study the influence of such damages on the static behavior of the single-layer plane cable net, a full-scale model with the dimension of 4.85m×4.85m and 4×4 grids was designed and constructed. Static tests were conducted after introducing three types of damages including failure of connectors between horizontal and vertical cables, cable prestress loss and cable anchorage failure. The results indicate that, failure of connectors between horizontal and vertical cables almost has no influence on the static behavior of the single-layer plane cable net; the change of nodal displacements induced by the cable prestress loss does not exceed 15%; the cable anchorage failure affects the local part of the single-layer plane cable net significantly, and the induced change of nodal displacements is between 18% and 36%; damages have stronger effect on nodal displacements than cable tension forces. The intensity of the influence of damages depends on the damage degree and location, and decreases with the increase of load. The research results provide a sound foundation for establishing the safety evaluating method of in-service single-layer plane cable net structures.

**Keywords:** single-layer plane cable net; damage; full-scale test; static behavior

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAJ01A03-02)。

作者简介:施刚(1977—),男,安徽铜陵人,工学博士,副教授。E-mail:shigang@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2009年4月

## 0 引言

单层平面索网作为玻璃幕墙的支承结构,近年来被广泛地应用于公共建筑。国外工程如瑞士巴塞尔火车站(图1)、慕尼黑 Kempinski 旅馆、英国 Tower Place 等;国内工程如北京土城电话局、新保利大厦二期工程(图2)、中石油大厦等。作为一种新型预张力结构体系,单层平面索网具有柔性大、质量轻、阻尼小、自振频率低的特点<sup>[1]</sup>。单层索网结构主要由预应力拉索、横索与竖索连接件(包括压块、螺杆和螺母)、拉索与主体结构连接件(锚具)组成,如图3所示。目前,对于这种结构体系,国内外的研究主要集中在完好结构的静力性能<sup>[2-3]</sup>、动力特性<sup>[4-5]</sup>、几何非线性<sup>[6-8]</sup>、施工张拉控制<sup>[9-10]</sup>以及玻璃板与索网协同工作<sup>[11]</sup>等方面。



图1 瑞士巴塞尔火车站 图2 新保利大厦二期工程  
Fig.1 Basel Railway Station Fig.2 Beijing New Poly Plaza



图3 单层平面索网结构组成示意图  
Fig.3 Components of a single-layer plane cable net

在单层平面索网玻璃幕墙建筑物的使用过程中,单层索网作为支承结构,不可避免地会受到各种损伤。例如,索的锚固端破坏会造成预应力拉索几乎失效;由于材料本身的受力特性,预应力索的预拉力会随着时间的推移而减小;温度变化也会导致索的

预拉力损失;此外,施工中也很难保证索的预拉力与设计值完全相同,通常会有一定的偏差;特别是,两个方向的索与索之间的连接节点也可能发生松弛甚至完全失效,从而造成在局部区域两个不同方向的索不能共同受力。上述这些损伤因素都会对单层平面索网结构的承载力和刚度等产生影响,甚至影响结构的安全性和使用性能。但是目前国内外尚未见到对这一问题进行研究。本文采用足尺模型试验的方法,研究了索与索之间连接节点失效、索的预应力损失、索的锚固端破坏等三种损伤因素对单层平面索网结构静力承载性能的影响。

## 1 损伤因素及其原因分析

对于单层平面索网不同的组成部分,其所起作用不同,结构使用过程中,引起损伤的原因也不同。

### 1.1 索与索之间连接节点失效

横索与竖索连接件通常由压块、螺杆和螺母组成,通过拧紧螺母产生预紧力,压块将横索与竖索紧密地连结在一起。连接件对横索与竖索起锁紧定位作用,防止索在受力时产生滑移。由于不断有循环往复的力经横索与竖索连接件进行传递,拧紧螺母产生的预紧力会发生损失;另外,由于施工、材料本身的缺陷也可导致预紧力不足,从而导致在一定条件下横索与竖索在连接节点处发生滑移。

### 1.2 索的预应力损失

单层索网结构作为一种柔性支承体系,在施加预应力之前,体系往往处于静不定的机构状态,其形态的维持和必要刚度的产生有赖于预应力的施加。因此,预应力在单索结构的各项性能中发挥着极为重要的作用。索的预应力损失普遍存在,引起索预应力损失的原因主要包括:

#### (1) 钢索松弛引起的预应力损失

任何钢材都具有应力松弛特性,其原因主要是金属内部晶格间错位的积累使一部分弹性变形转化为塑性变形。在长期荷载作用下,钢绞线的松弛量与受荷大小及环境温度有关,一般随荷载的增加而增大,随环境温度的升高而增大<sup>[12]</sup>。

#### (2) 温度变化引起的预应力损失

使用过程中,单层索网结构所处环境温度将不断变化。由于材料的热胀冷缩,当环境温度升高时,预应力索膨胀,索拉力值降低,其损失值为预应力索的线膨胀系数、弹性模量与温差的乘积。

由钢索松弛和温度变化引起的索拉力损失,单根索应力变化均匀,认为各索之间互不影响。

### 1.3 锚固端损伤和破坏

单层平面索网体系中的每根索都是通过端部锚

具固定在主体结构上,锚固端是整个索网体系工作的基础。钢索内的预拉力和受荷载所产生的应力均通过锚固端传到主体结构上,锚固端起着重要的定位、连接、传力作用。锚固端损伤包括锚具损伤与主体结构变形。锚具长期承受索拉力作用,将产生徐变,同时受环境影响可能发生锈蚀,这些损伤将使其承载性能降低,变形增大。对于主体结构,与锚具相连的受荷区域是应力集中区,随着时间的推移将产生塑性变形。除索网荷载外,主体结构还将承受其他的外部作用,这些外部作用将使主体结构产生各种变形和损伤,从而导致与索网相连的部位发生变形或损伤。在设计、施工不尽合理,维护水平较低时,某些极端条件下,将发生锚具失效或与锚具相连的主体结构受荷局部区域破坏等锚固端破坏的情形。

锚固端损伤和破坏对索网结构的影响,由损伤部位开始向整个索网扩展(图4),这将导致索网形状和应力的重分布,单根索不同部位的应力变化将有所不同,各索之间相互影响。

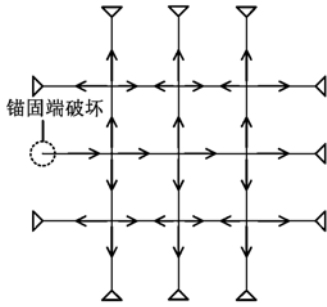


图4 损伤传递示意图  
Fig. 4 Damage transfer

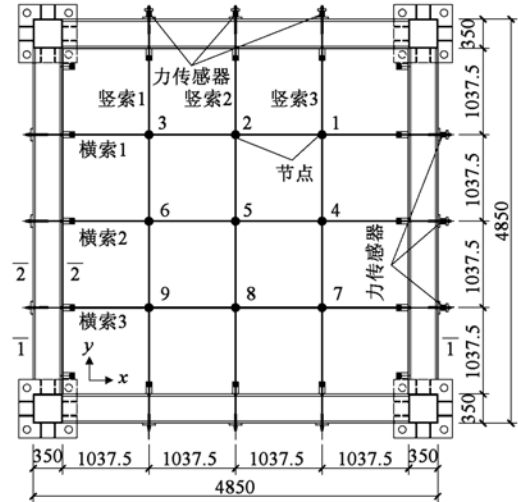
## 2 试验概况

### 2.1 试件设计

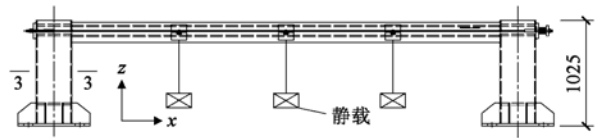
参考目前国内外实际工程,并结合实验室场地条件、预应力索和钢化玻璃的加工制作条件,设计平面索网试验模型如图5所示。试件为正方形,外轮廓尺寸为 $4.85\text{m} \times 4.85\text{m}$ ,索网采用 $4 \times 4$ 网格,每个网格尺寸为 $1.0375\text{m} \times 1.0375\text{m}$ 。索采用 $\Phi 10$  高强不锈钢绞线,弹性模量为 $1.5 \times 10^5 \text{MPa}$ ,破断拉力 $80.0\text{kN}$ 。试件周围由焊接箱形梁组成,梁翼缘板厚 $25\text{mm}$ ,腹板厚 $14\text{mm}$ ,梁高 $350\text{mm}$ ,如图5c所示。柱子采用 $350\text{mm} \times 12\text{mm}$ 焊接箱形截面,柱脚由底板和加劲肋与柱子焊接而成,如图5d所示。梁柱均采用Q235钢材。

试件中典型的节点连接包括横索与竖索连接节点和索与边框连接节点两种:

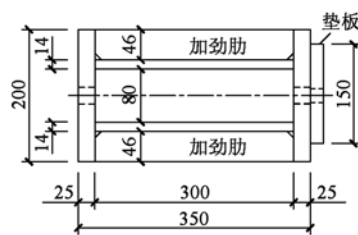
#### (1) 横索与竖索连接节点



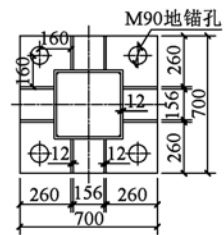
(a) 试件几何尺寸



(b) 1-1剖面图



(c) 2-2剖面图(梁截面)



(d) 3-3剖面图(柱脚)

图5 试件尺寸与构造

Fig. 5 Test specimens

横索与竖索通过金属连接件(压块、螺杆、螺母)相连,连接节点如图6a所示。横索与竖索能否紧密连结、共同受力,主要取决于横索、竖索与压块产生的摩擦力,而摩擦力的大小由拧紧螺母产生的预紧力决定。拧紧螺母,当预紧力足够大时,便可固定横索与竖索。试验过程中的节点失效,是通过完全放松螺母使压块与索之间压力为零从而使得横索与竖索在索网平面内可自由滑动。螺母的松紧只影响横索与竖索平面内的耦合情况,一般不影响横索与竖索在索网平面外的耦合,即横索与竖索在 $z$ 方向(图5b)的自由度仍然耦合。

#### (2) 索和边框连接节点

在边框焊接箱梁上预留 $\Phi 26$ 的圆孔,以便索从钢梁中穿过(图6b)。索一端采用螺母将其固定在边框外侧(图6c),另一端布置力传感器(图6d)。

### 2.2 加载方案

试验现场加载如图7所示。每个柱脚底板上预留4个圆孔(图5d),采用丝杠与实验室地锚相连。

#### 2.2.1 索预应力的施加

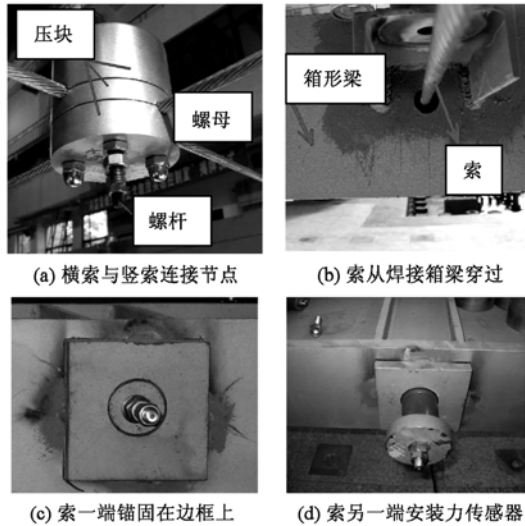


图6 节点连接

Fig. 6 Details of connection

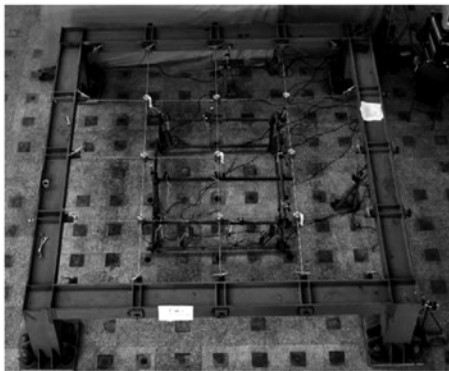


图7 试验现场图

Fig. 7 Test set-up

试验过程中,采用扳手拧紧或放松索端螺母,并通过力传感器实时监测索力来实现索力的施加和调整。由于试件边框具有很强的刚度,索力可通过一次张拉到位;各索索力基本达到设计值后,再通过微调消除索相互间的微弱影响。各索预拉力试验设计值均为 12kN。

### 2.2.2 静力加载方法

为方便试验加载,将试件平放;通过在横索与竖索连接节点处施加垂直于索网平面的集中荷载,来模拟实际结构中风荷载通过玻璃传递到索网上的力,如图 5b 所示。荷载通过吊篮用砝码施加,每个吊篮重 4.5kg,每块砝码重 20kg。根据规范<sup>[13]</sup>的最低取值确定风荷载为 1kN/m<sup>2</sup>,换算成每个节点荷载约为 1.0kN,实际施加荷载为 104.5kg 即 1.024kN,并分 6 级加载(0.044kN、0.240kN、0.436kN、0.632kN、0.828kN、1.024kN)。

### 2.2.3 横索与竖索连接节点失效

试验采用人为放松连接件上的螺母来模拟横索与竖索连接节点失效。在相同的荷载和预拉力(各

索预拉力试验设计值均为 12kN)条件下,先进行完好索网的静力加载试验,然后再进行横索与竖索连接节点失效的加载试验;其中完好索网为各连接件上螺母均拧紧,横索与竖索连接节点失效工况包括:节点 2 失效、节点 5 失效和全部节点失效。

### 2.2.4 索的预应力损失

试验通过改变预应力索的初始拉力值模拟索的预应力损失。在相同的静力荷载条件下,先进行完好索网的静力加载试验,然后再进行索发生预应力损失后的加载试验;其中完好索网指各索的预拉力值均为设计值 12kN,其他工况下的索初始预拉力值如表 1 所示。表 1 中加载工况如“横索 1 损失 33%”表示横索 1 预应力损失值为设计值的 33%,即索拉力损失 4kN。

表 1 各工况下的索初始预拉力

Table 1 Initial pretension forces of cables

加载工况	初始预拉力/kN					
	横索 1	横索 2	横索 3	竖索 1	竖索 2	竖索 3
完好索网	12	12	12	12	12	12
横索 1 损失 33%	8	12	12	12	12	12
横索 1 损失 66%	4	12	12	12	12	12
横索 2 损失 33%	12	8	12	12	12	12
横索 2 损失 66%	12	4	12	12	12	12
全部横索损失 33%	8	8	8	12	12	12
全部横索损失 66%	4	4	4	12	12	12

### 2.2.5 锚固端破坏

人为拆除索端螺母来模拟锚固端破坏,试验工况包括横索 1 锚固端破坏、横索 2 锚固端破坏。其中,横索 1 锚固端破坏的实施过程为:张拉预应力索,使各索索力达到 12kN;拧紧横索与竖索连接节点处各压块上的螺母,固定横索与竖索;最后拆除横索 1 一侧锚固端的索端螺母。横索 2 锚固端破坏的实施过程与横索 1 类似。

### 2.3 量测内容

试验的量测内容包括各种工况下的索拉力和横索与竖索连接节点的平面外位移。其中索拉力由力传感器测量,全部节点的位移由位移计进行测量。

位移测点(即两个方向的索与索之间的连接节点)测量编号、力传感器、轴线的布置以及索的编号如图 5a 和图 5b 所示。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 横索与竖索连接节点失效

节点失效工况与完好索网相比,结构各节点的平面外位移和各索索拉力几乎没有改变(表 2 和表 3)。各种工况下的位移-荷载曲线和索力-荷载曲线几乎重合(图 8 和图 9)。可见,试验中节点失效对单

层平面索网承载性能几乎没有影响。

柔性结构在充分施加预应力的情况下,其形态较为稳定。横索与竖索在连接节点处可以自由滑动,相当于在连接节点处横索与竖索的平面内约束刚度为零,而平面外的约束刚度较强。当单层平面索网结构承受面外荷载作用时,连接节点处面内约束刚度的损失,不会影响面外荷载在横竖索间的分配,对索网结构的承载性能不会产生影响。

表2 完好索网和节点失效索网的节点平面外位移比较

Table 2 Comparison of nodal displacements between undamaged cable net and cable net with connection failure

索网状态	完好		节点2失效		节点5失效		全部节点失效	
	$D_0$ /mm	$D_1$ /mm	$D_1/D_0$	$D_2$ /mm	$D_2/D_0$	$D_3$ /mm	$D_3/D_0$	
节点1	41.892	41.797	0.9977	41.789	0.9975	42.197	1.0073	
节点2	57.094	57.114	1.0004	56.880	0.9962	57.257	1.0028	
节点5	72.842	72.460	0.9948	72.559	0.9961	72.848	1.0001	
节点6	58.527	58.045	0.9918	58.067	0.9921	58.415	0.9981	
节点7	48.961	48.688	0.9944	48.476	0.9901	48.946	0.9997	

注: $D_0$ 为完好索网时的节点平面外位移, $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 分别为节点2、节点5、全部节点失效的节点平面外位移,节点编号见图5a。

表3 完好索网和节点失效索网的索拉力比较

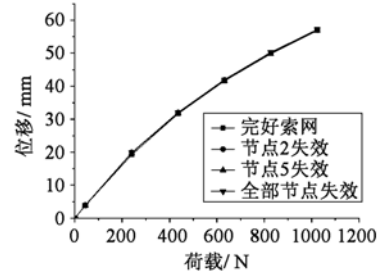
Table 3 Comparison of the cable tension force between undamaged cable net and cable net with connection failure

索网状态	完好		节点2失效		节点5失效		全部节点失效	
	$T_0$ /N	$T_1$ /N	$T_1/T_0$	$T_2$ /N	$T_2/T_0$	$T_3$ /N	$T_3/T_0$	
横索2	18674	18586	0.9953	18698	1.0013	18762	1.0047	
横索3	16930	16932	1.0001	16880	0.9970	17076	1.0086	
竖索1	16942	16939	0.9998	16966	1.0014	16875	0.9960	
竖索2	18444	18468	1.0013	18418	0.9986	18426	0.9990	

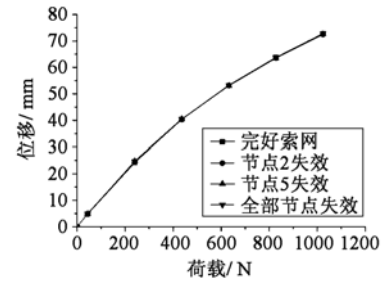
注: $T_0$ 为完好索网的实测拉力, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 分别为节点2、节点5、全部节点失效时索的实测拉力,索编号见图5a。由于试验正值冬季,受实验室内温度变化影响,各索初始预拉力值并非为12kN,故此完好索网试验结果较下文有所不同。

### 3.2 索的预应力损失

索的预应力损失对节点平面外位移,即索网结构刚度影响的试验测量结果如表4所示。单根索预应力损失时,预应力损失索上各节点的平面外位移变化率明显大于其他各节点;并且随着与预应力损失索距离的增大,节点的平面外位移变化率迅速减小。从表4可以看到,当横索1预应力损失66%(工况横索1损失66%)时,横索1上的节点(节点1、2、3)的平面外位移变化率明显大于其他节点;随着与横索1距离的增大,横索2上的节点(节点4、5、6)及横索3上的节点(节点7、8、9)的平面外位移变化率依次减小。全部横索预应力损失时,各节点平面外位移变化率比较接近。各损伤工况下,节点位移变化率均在15%以内。



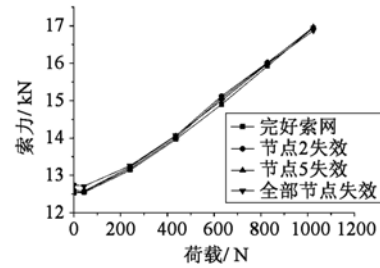
(a) 节点2



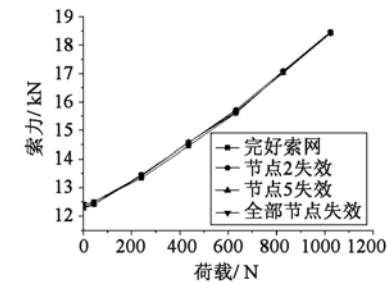
(b) 节点5

图8 典型节点平面外位移-荷载曲线

Fig. 8 Displacement-load curves of typical connections



(a) 竖索1



(b) 竖索2

图9 典型竖索索力-荷载曲线

Fig. 9 Cable tension force-load curves of typical connections

索的预应力损失对各索索力影响的试验测量结果如表5所示。横索预应力损失引起各竖索索力的变化比较均匀。在横索1预应力损失时,横索索力的变化幅度随着与横索1距离的增大而迅速减小。各工况对竖索索力的影响大于横索,且索拉力变化率不超过10%。

由于索拉力的增量是引起结构位移的高阶量,索拉力的变化幅度小于平面外位移的变化幅度,试

验结果也验证了这一点,同样损伤情况下平面外位移变化率明显高于索拉力变化率。因此,考查索的预应力损失对单层平面索网结构承载性能的影响,要更加注重其结构平面外位移(挠度)的变化<sup>[2]</sup>。

索预应力损失后索网节点平面外位移随荷载变化情况如图10所示。节点平面外位移变化主要取决于预应力损失大小和该节点与损失预应力索的距离:预应力损失越大,与损失预应力索距离越近,所受影响越大。例如,对于节点8,与损失预应力索的距离由近及远的工况分别是全部横索预应力损失、横索2预应力损失、横索1预应力损失,因此相同的索预应力损失率下,对节点平面外位移的影响由大

到小分别是全部横索预应力损失、横索2预应力损失、横索1预应力损失。对于相同的损伤位置,索的预应力损失率越高即损伤越大,对节点位移影响越大。索预应力损失的各损伤工况与完好索网的平面外位移-荷载曲线比较接近,说明索预应力损失对节点挠度影响较小。

索的预应力损失率对节点平面外位移的影响如图11所示。对同一根索,随着索预应力损失率的增加,节点平面外位移增大,但索预应力损失率与节点平面外位移呈非线性关系,随着索预应力损失率的增大,节点平面外位移增加减缓。

可见,索的预应力损失对单层平面索网结构承

表4 完好索网和索预应力损失索网的节点平面外位移比较

Table 4 Comparison of nodal displacement between undamaged cable net and cable net with prestress loss

索网 状态	完好	横索1损失33%			横索1损失66%		横索2损失33%		横索2损失66%		全部横索损失33%		全部横索损失66%	
	$D_0$ /mm	$D_1$ /mm	$D_1/D_0$	$D_2$ /mm	$D_2/D_0$	$D_3$ /mm	$D_3/D_0$	$D_4$ /mm	$D_4/D_0$	$D_5$ /mm	$D_5/D_0$	$D_6$ /mm	$D_6/D_0$	
节点1	45.328	47.876	1.0562	50.569	1.1156	45.702	1.0083	46.356	1.0227	49.161	1.0846	50.047	1.1041	
节点2	53.813	56.328	1.0467	58.376	1.0848	54.189	1.0070	54.914	1.0205	57.678	1.0718	58.718	1.0912	
节点3	44.831	47.612	1.0620	49.726	1.1092	45.156	1.0073	45.716	1.0197	48.741	1.0872	50.272	1.1214	
节点4	56.725	57.938	1.0214	58.439	1.0302	58.741	1.0355	60.907	1.0737	61.044	1.0761	62.087	1.0954	
节点5	69.909	71.411	1.0215	71.696	1.0256	70.707	1.0114	74.165	1.0609	74.829	1.0704	75.999	1.0871	
节点6	58.230	59.748	1.0261	59.941	1.0294	60.300	1.0356	62.909	1.0804	63.219	1.0857	62.571	1.0746	
节点7	46.873	47.877	1.0214	47.645	1.0165	47.353	1.0103	47.939	1.0228	50.561	1.0787	52.002	1.1094	
节点8	54.692	55.522	1.0152	55.386	1.0127	55.076	1.0070	55.894	1.0220	57.808	1.0570	58.798	1.0751	
节点9	46.508	47.353	1.0182	47.113	1.0130	47.031	1.0112	47.693	1.0255	50.081	1.0768	52.445	1.1277	

注: $D_0$ 为完好索网时的节点平面外位移, $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$ 分别为横索1预应力损失33%、横索1预应力损失66%、横索2预应力损失33%、横索2预应力损失66%、全部横索预应力损失33%、全部横索预应力损失66%时的节点平面外位移,节点编号见图5a。

表5 完好索网和索预应力损失索网的索拉力比较

Table 5 Comparison of cable tension force between undamaged cable net and cable net with prestress loss

索网 状态	完好	横索1损失33%		横索1损失66%		横索2损失33%		横索2损失66%		全部横索损失33%		全部横索损失66%	
	$T_0$ /N	$T_1$ /N	$T_1/T_0$	$T_2$ /N	$T_2/T_0$	$T_3$ /N	$T_3/T_0$	$T_4$ /N	$T_4/T_0$	$T_5$ /N	$T_5/T_0$	$T_6$ /N	$T_6/T_0$
竖索1	15.936	16.558	1.0390	16.710	1.0486	16.314	1.0238	16.610	1.0423	16.804	1.0545	17.179	1.0780
竖索2	17.602	18.100	1.0283	18.220	1.0351	17.816	1.0121	18.200	1.0339	18.428	1.0469	18.959	1.0771
竖索3	15.538	15.997	1.0295	16.158	1.0399	15.708	1.0109	15.980	1.0284	16.345	1.0519	16.327	1.0508
横索1	16.125	12.705	0.7879	9.042	0.5607	16.278	1.0095	16.413	1.0178	12.752	0.7908	9.050	0.5613
横索2	18.281	18.690	1.0224	18.921	1.0350	14.900	0.8150	11.738	0.6421	15.426	0.8438	11.979	0.6552
横索3	16.316	16.366	1.0031	16.404	1.0054	16.566	1.0153	16.678	1.0222	12.720	0.7796	9.193	0.5635

注: $T_0$ 为完好索网索的实测拉力, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 、 $T_6$ 分别为横索1预应力损失33%、横索1预应力损失66%、横索2预应力损失33%、横索2预应力损失66%、全部横索预应力损失33%、全部横索预应力损失66%时的索的实测拉力,索编号见图5a。

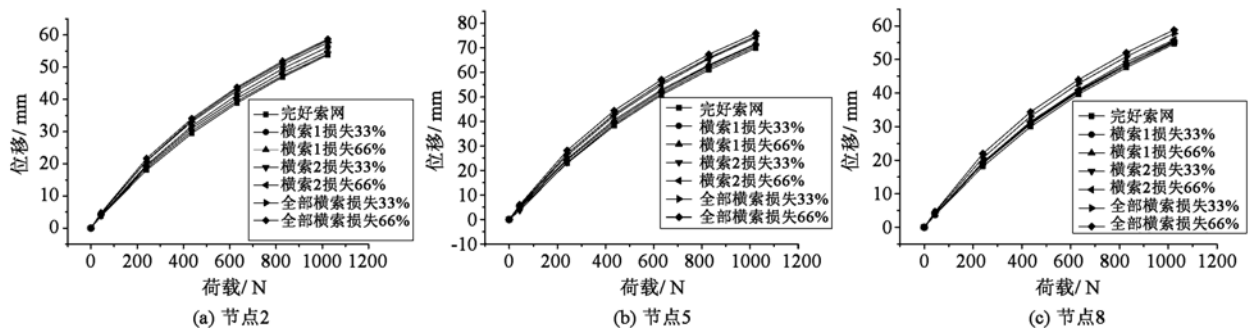


图10 典型节点平面外位移-荷载曲线图

Fig. 10 Displacement-load curves of typical connections

载性能的影响主要取决于预应力损失索的位置和预应力损失率这两个因素。距预应力损失索越近的区域,受到的影响越大,远离区域则基本不受影响;预应力损失率越高影响越大。

### 3.3 锚固端破坏

锚固端破坏对结构静力性能产生影响的机理在于锚固端破坏导致该索失去承受荷载的基础,索预应力损失殆尽,该索几乎退出工作,从而对结构局部刚度产生极大影响。锚固端破坏对节点平面外位移影响的试验测量结果如表6所示。发生锚固端破坏的预应力索上各节点的平面外位移变化率相当大,介于18%~36%之间;但随着与锚固端破坏索距离的增大,节点平面外位移变化率迅速减小。锚固端破坏对索拉力影响的试验测量结果如表7所示。横索锚固端破坏对竖索索力的影响较横索索力大,最大为13.27%。横索1锚固端破坏时,其他横索索力变化率随着与横索1距离的增大迅速减小。锚固端破坏对节点平面外位移的影响较索力大,所以应该更加重视结构平面外位移的变化。

锚固端破坏的索网结构典型节点的平面外位移-荷载曲线如图12所示。节点平面外位移变化主要取决于该节点与锚固端破坏索位置的距离,距离越近影响越大,反之则越小。

可见,锚固端破坏对结构局部影响很大,随着与锚固端破坏索距离的增大,结构所受影响迅速减小。

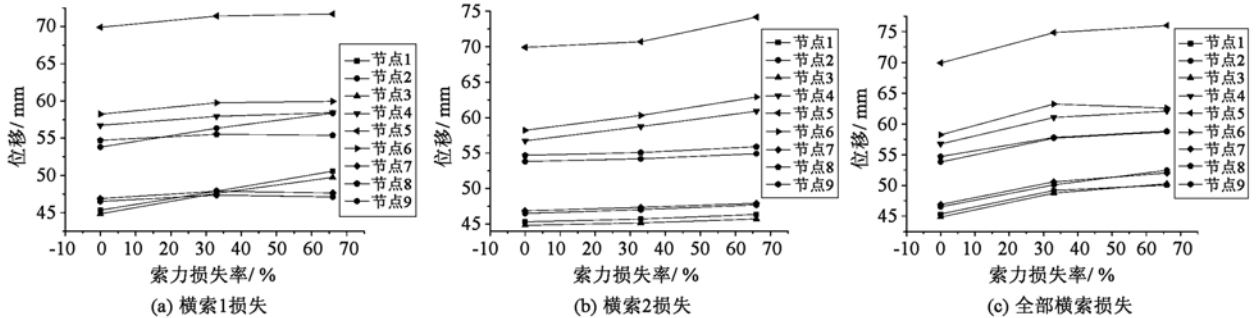


图11 节点平面外位移-索预应力损失率曲线

Fig. 11 Displacement-cable pretension force loss rate curves of typical connections

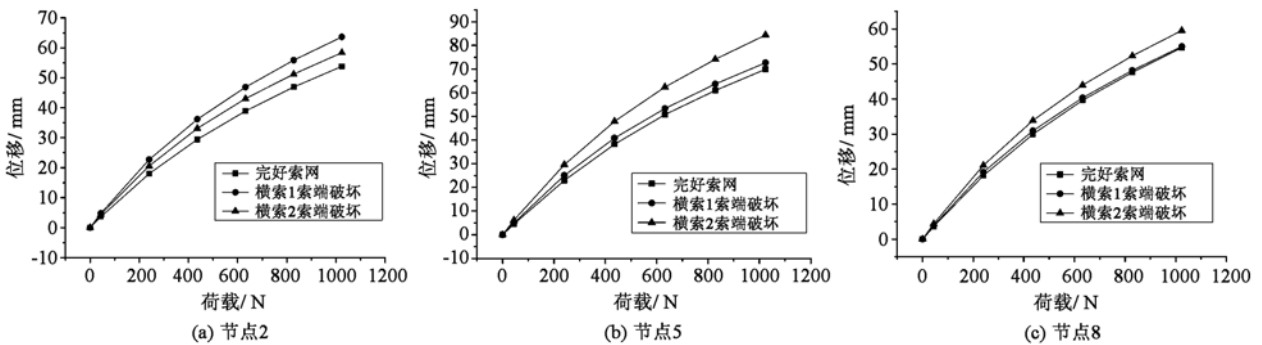


图12 典型节点平面外位移-荷载曲线

Fig. 12 Displacement-load curves of typical connections

表6 完好索网和锚固端破坏索网的节点平面外位移比较

Table 6 Comparison of nodal displacement between undamaged cable net and cable net with cable anchorage failure

索网状态	完好	横索1索端破坏		横索2索端破坏	
	$D_0$ /mm	$D_1$ /mm	$D_1/D_0$	$D_2$ /mm	$D_2/D_0$
节点1	45.328	59.340	1.3091	50.302	1.1097
节点2	53.813	63.643	1.1827	58.385	1.0850
节点3	44.831	59.005	1.3162	49.455	1.1031
节点4	56.725	60.667	1.0695	75.190	1.3255
节点5	69.909	72.680	1.0396	84.442	1.2079
节点6	58.230	61.803	1.0614	78.947	1.3558
节点7	46.873	47.178	1.0065	52.034	1.1101
节点8	54.692	55.024	1.0061	59.537	1.0886
节点9	46.508	45.361	0.9753	52.030	1.1187

注: $D_0$ 为完好索网时的节点平面外位移, $D_1$ 、 $D_2$ 分别为横索1索端破坏、横索2索端破坏时的节点平面外位移,节点编号见图5a所示。

### 3.4 讨论

对于6种预应力损失工况和2种锚固端破坏工况,除横索2锚固端破坏工况外,结构平面外位移最大点(节点5)的位移增大幅度均未超过10%。由于单层平面索网结构是几何非线性大变形结构体系,非线性刚度不可忽略。

下面根据文献[7]的单层平面索网整体结构的静力平衡方程进行进一步的分析讨论。

$$\left| \frac{H_x}{L_x^2} + \frac{H_z}{L_z^2} \right| w_c + \left| EA_x \frac{\pi^2}{6L_x^4} + EA_z \frac{\pi^2}{6L_z^4} \right| w_c^3 = \frac{p_0}{4} \quad (1)$$

表7 完好索网和锚固端破坏索网的索拉力比较  
Table 7 Comparison of cable tension forces between undamaged cable net and cable net with cable anchorage failure

索网状态	完好	横索1 索端破坏		横索2 索端破坏	
	$T_0/N$	$T_1/N$	$T_1/T_0$	$T_2/N$	$T_2/T_0$
竖索1	15.936	17.455	1.0953	18.051	1.1327
竖索2	17.602	18.481	1.0499	19.210	1.0914
竖索3	15.538	16.664	1.0724	17.254	1.1104
横索1	16.125	—	—	17.838	1.1062
横索2	18.281	19.518	1.0677	—	—
横索3	16.316	16.799	1.0296	17.834	1.0930

注:  $T_0$  为完好索网的实测拉力,  $T_1$ 、 $T_2$  分别为横索1 索端破坏、横索2 索端破坏时索的实测拉力;表中索编号见图5a 所示。

式(1)中结构的初应力刚度为:

$$a = \left| \frac{H_x}{L_x^2} + \frac{H_z}{L_z^2} \right| \quad (2)$$

非线性刚度为:

$$b = \left| EA_x \frac{\pi^2}{6L_x^4} + EA_z \frac{\pi^2}{6L_z^4} \right| w_c^2 \quad (3)$$

式中:  $H_x$  和  $H_z$  为索网平面内  $x$  和  $z$  方向单位宽度内初始索拉力的水平分量;  $w_c$  为结构中点在荷载下的位移;  $A_x$  和  $A_z$  为  $x$  和  $z$  方向单位宽度内结构初始的索截面面积;  $E$  为索的弹性模量;  $p_0$  为均布荷载<sup>[7]</sup>。

由式(1)~(3)可知,对于索预应力损失和锚固端破坏这两种损伤因素,相同损伤引起的初应力刚度变化值相同。外荷载增加时,结构挠度增大,非线性刚度提高,结构总刚度增大,故相同损伤引起的初应力刚度变化值与总刚度的比值减小。因此,相同损伤对结构的影响程度降低,如图13所示结构最大平面外位移的变化率随着荷载的增加呈减小趋势。表4和表6中(横索2 索端破坏)结构平面外位移最大点的位移增大幅度是在结构产生很大变形情况下测得的,这时损伤因素引起的初应力刚度变化值与总刚度的比值较小,所以对索网结构的受力性能影响不大。

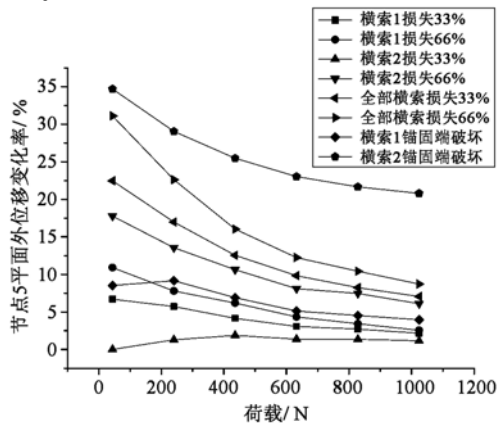


图13 节点5平面外位移变化率随荷载变化情况

Fig.13 Out-of-plane displacement-load curves of node 5

## 4 结论

(1) 在面外荷载作用下,横索与竖索连接节点失效(即平面内约束失效)对单层平面索网结构的承载性能几乎没有影响。

(2) 索预应力损失或锚固端破坏时,节点平面外位移变化率较索力变化率大,考查损伤因素对结构承载性能的影响,要更加注重其结构平面外位移的变化。

(3) 索预应力损失或锚固端破坏时,节点平面外位移和索力变化情况取决于损伤大小和与损伤位置的距离这两个因素;损伤越大,距损伤位置越近,节点平面外位移和索力变化越大,反之则越小。

(4) 索预应力损失对单层平面索网结构受力性能影响不大,节点平面外位移变化率均在15%以内。

(5) 锚固端破坏的本质是发生锚固端破坏的预应力索退出工作,其对单层平面索网结构受力性能的局部影响较大;锚固端破坏的索上节点平面外位移变化率介于18%~36%,应引起充分重视。

(6) 相同损伤对单层平面索网结构的影响程度,随着面外荷载的增加而减小。

### 参 考 文 献

- [1] 冯若强,武岳,沈世钊. 单层平面索网幕墙结构的风激动力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(2): 153-155. (FENG Ruoqiang, WU Yue, SHEN Shizhao. Wind-induced dynamic performance of cable net glazing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(2): 153-155. (in Chinese))
- [2] 冯若强,武岳,沈世钊. 考虑玻璃参与工作的单层平面索网幕墙结构静力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 99-106. (FENG Ruoqiang, WU Yue, SHEN Shizhao. Static performance of single-layer plane cable net glass curtain in consideration of glass panel [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 99-106. (in Chinese))
- [3] 王元清,孙芬,石永久,等. 点支式玻璃幕墙单层索网体系承载性能试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(5): 769-774. (WANG Yuanqing, SUN Fen, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on monolayer cable net for point supported glass curtain wall [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(5): 769-774. (in Chinese))
- [4] 冯若强,花定兴,武岳,等. 单层平面索网幕墙结构玻璃与索网协同工作的动力性能研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 27-33. (FENG Ruoqiang, HUA Dingxing, WU Yue, et al. Dynamic performance of cable net facade with consideration of glass panels



- [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 27-33. (in Chinese))
- [5] 吴丽丽, 王元清, 石永久. 点支式玻璃建筑单层索网体系的动力特性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(3): 39-42. (WU Lili, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Analysis on dynamic properties of monolayer cable net for point-supported glass facade [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(3): 39-42. (in Chinese))
- [6] 吴丽丽, 王元清, 石永久. 单层平面索网结构风振响应的几何非线性特性研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 30-34. (WU Lili, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Study on nonlinear characteristics of wind-induced response of a monolayer cable net system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 30-34. (in Chinese))
- [7] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 单层平面索网幕墙结构的几何非线性问题研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25(5): 640-646. (FENG Ruoqiang, WU Yue, SHEN Shizhao. Geometric nonlinearity of cable net facade [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(5): 640-646. (in Chinese))
- [8] Kebiche K, Kazi-Aoual M N, Motro R. Geometrical nonlinear analysis of tensegrity systems [J]. Engineering Structures, 1999, 21(9): 864-876.
- [9] 吴丽丽, 王元清, 石永久, 等. 点支式玻璃建筑单层索网体系施工技术分析[J]. 施工技术, 2005, 34(10): 41-44. (WU Lili, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Construction technology analysis on single-layer cable network in point-supporting glass facade [J]. Construction Technology, 2005, 34(10): 41-44. (in Chinese))
- [10] 杜彦凯, 全为民, 吕学政, 等. 柔性边界幕墙索网张拉施工方法研究[J]. 施工技术, 2008, 37(5): 123-126. (DU Yankai, TONG Weimin, LÜ Xuezheng, et al. Research on tension method of curtain-wall cable-net with flexible edge [J]. Construction Technology, 2008, 37(5): 123-126. (in Chinese))
- [11] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 单索幕墙体系中的玻璃与索协同工作机理研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(5): 619-623. (FENG Ruoqiang, WU Yue, SHEN Shizhao. Study on the mechanism of glass panels working in cooperation with single-layer cable net glass curtain [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(5): 619-623. (in Chinese))
- [12] 周永红, 何思明, 杨雪莲. 预应力锚索的预应力损失机理研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1353-1356. (ZHOU Yonghong, HE Siming, YANG Xuelian. Study on prestress loss of anchor cables under long-term loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1353-1356. (in Chinese))
- [13] JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规程[S]. (JGJ 102—2003 Technical code for glass curtain wall engineering[S]. (in Chinese))